JCSS
Japan Calibration
Service System

# JCSS
# 不確かさ見積もりに関するガイド

## 登録に係る区分：長さ

## 校正手法の区分の呼称：形状測定器

## 計量器等の種類：平面度

第 5 版

*（JCG201S81－05）*

改正：2026 年 4 月 1 日

独立行政法人製品評価技術基盤機構

適合性評価推進センター　認定センター

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

**平面度の不確かさ見積もりガイド**

本事例は、不確かさの見積もりの一事例を示したものであり、実際には校正事業者は諸条件を考慮して見積もりを行うこと。また、不確かさの成分ごとに見積もられた数値は、校正事業者自らがその根拠を示せることが必要である。

【測定面が平面であるものの場合の事例:フィゾー干渉計を使用する場合】

1．校正方法の概要

フィゾー干渉計を用いて、被測定物の平面度を校正する例を示す。

常用参照標準が長さ用 633 nm 実用波長安定化ヘリウムネオンレーザ装置の場合は、組み込まれた平面度基準板の絶対形状を自己校正法などにより評価する。

常用参照標準が平面度基準板の場合は、この平面度基準板は JCSS 校正されていること。ここに示すのは、干渉縞位相の読み取りに5ステップの位相シフトアルゴリズムを使用した事例である。

（参考文献1を参照）

2．不確かさの要因

(1) 使用したレーザの波長の不確かさ　$u_w$

平面度は幾何学量の一つである。したがってその表示には長さの単位を使う。しかしながら平面度などの幾何偏差量は、ブロックゲージなどの寸法測定とは異なり、必要とされる桁数が非常に少なくせいぜい 5 桁程度である。

光源として安定化ヘリウムネオンレーザ（λ = 632.8196 nm in air）を使用した場合、その周波数の、よう素安定化ヘリウムネオンレーザの勧告周波数からのずれは 7 桁以下であり、安定度も同程度である。したがって光源周波数のずれや安定度が、測定の不確かさに与える影響はほぼ無視できる。

これらは、常用参照標準が長さ用 633 nm 実用波長安定化ヘリウムネオンレーザ装置の場合は、校正証明書により確認できる。

常用参照標準が平面度基準板の場合は、一般的な値を用いることができる。

測定は大気中で行われるため、光源の周波数から大気中での波長を算出する必要がある。光の波長を算出するのによく使われる Ciddor の式で考慮されている要因は、空気の温度、気圧、湿度、二酸化炭素濃度である。例えば測定を恒温室で行い、温度が 20 ℃±1 ℃に制御されている場合、温度による波長の変動は非常に小さい。湿度と二酸化炭素濃度による影響は、さらに小さい。最も大きな影響を与えるのは気圧である。標準状態からの変動が±50 hPa（σ=28.9 hPa）

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

を超えることがない場合、その変動が測定誤差に与える影響は $7.73\times10^{-5}$ である。

平面度が悪い試料を測定した場合、干渉縞の本数が多くなりすぎて測定が不可能になる。最大で 30 本の縞を観測できるとすると、試料の平面度は 30 × 632.8196 / 2 であり、約 10 μm となる。この場合、レーザ波長の不確かさが測定結果に与える影響は、$u_w$ = 0.773 nm である。

(2) 位相測定の不確かさ　$u_p$

(2.1) PZT のリニアリティー　$u_{p-p}$

5 ステップアルゴリズムを使って各測定点の光強度の変化から、その点の位相を計算する場合を考える。位相シフトは、平面度校正装置に組み込まれた平面度基準板を PZT で支え、PZT を伸縮させることにより実現している。したがって PZT への印加電圧に対する伸び量の非線形誤差が、測定の誤差要因となる。

使用している PZT の非線形誤差は、製品データシートによると、0.2 %以下であり、2 次の非線形誤差係数であると仮定する。ゲイン誤差も存在するが次の $u_{p-v}$ に含めて考える。

PZT の実際の伸び量 $\alpha_r'$ は、ゲインの誤差を $e_1$ 、2 次の非線形誤差係数を $e_2$ とし、設計した PZT の伸び量 $\alpha_r$ を使って

$$\alpha_r' = \alpha_r\left(1 + e_1 + e_2\left(\frac{\alpha_r}{\pi}\right)\right)$$

と表される。この場合の、5 ステップ法による位相計算の誤差 $\Delta_\varphi/4\pi$ は、

$$\frac{\Delta_\varphi}{4\pi} = \pi\frac{e_1^{\,2}}{32} + \frac{e_2}{8} \qquad (1)$$

と表されるので、その大きさは 1/4000 wavelength となる。（参考文献2）
この大きさを幅とする一様分布と考えると

$u_{p-p}$ = 1/6930 wavelength = 0.0913 nm

(2.2) PZT に印加した電圧の不確かさ　$u_{p-v}$

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

PZT に印加する電圧はコンピュータによって計算され、D/A 変換ボード、高圧アンプを通して、PZT に印加される。

光源の波長の半分の伸びを PZT が示す電圧値は、あらかじめ校正しておく必要がある。この値に誤差があると、得られる形状に周期的な誤差が発生する。その誤差は位相計算の途中で使う arctan 関数の非連続点に発生しがちである。これを実験により確かめるには、同じ被測定物をヌル縞（平面度干渉計に組み込まれた基準板と測定対象とを、互いの平行度が十分によい状態にセッティングすると、測定対象の形状にもよるが、干渉画像に縞が一本も見えず測定領域全面が同じ色の状態が観測される。この状態の干渉画像をヌル縞と呼ぶ。）で測定した場合と、縞を出して測定した場合の差を見ればよい。例えばこれが P-V で 5 nm であったとすると一様分布を仮定し、

$u_{p-v}$ = 1.44 nm である。

(2.3) テレビカメラによる光強度測定の不確かさ　$u_{p-t}$

発生した干渉縞を観察するテレビカメラの、受けた光強度に対する出力の大きさにも非線形誤差やノイズが存在する。ノイズレベルは、使用したカメラのカタログによると 0.1 %となっている。非線形誤差のデータは得られなかったが、最高級のカメラであることを考慮して、ノイズとトータルで 0.5 %を超えることはないと仮定した。これを 2 次の誤差と考えると(1)式より、1/1600 wavelength となる。この大きさの一様分布と考えると

$u_{p-t}$ = 1/2770 wavelength = 0.0226 nm となる。

(3) 実際の測定において発生する不確かさ　$u_m$

(3.1) 測定の繰り返し　$u_{m-r}$

測定ギャップを大きくし、マスクを被測定物いっぱいまで大きくした、かなり条件の悪い実験を行った際の測定の繰り返しは 1σで 1.4 nm であった。

(3.2) 測定位置による不確かさ　$u_{m-p}$

測定領域よりも小さい被測定物を用いて、測定位置を、中央、右、左、手前、奥と変え、さらに繰り返しを含んだ実験を行い、分散分析を行った結果、位置による影響は 1σで 3.14 nm であった。

(3.3) 偏差マップを使った補正の際の位置ずれ　$u_{m-c}$

絶対形状を得るためには、あらかじめ求めておいた平面度基準板の形状（これを偏差マップと

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

呼ぶ)を、測定結果から引き算する必要がある。完全な偏差マップが既に得られているとしても、平面度基準板の位置ずれにより誤差が発生する。平面度基準板は、位置決めピンを使ってセッティングしているため、大きな設置誤差は発生しない。ここでは最大でカメラの 1 ピクセルのずれが発生すると仮定する。

位置ずれによる誤差は、平面度基準板の形状の微分値によって決まる。平面度基準板が高次の空間周波数成分を持たないものとすると、その影響は小さいものと考えられる。平面度基準板の最大形状誤差が 40 分の 1 波長である場合、断面形状が球面の一部であると仮定すると、最大の傾斜を持つのは周辺部であり、干渉縞画像におけるカメラの 1 ピクセル 0.3 mm に対する傾きは 0.06 nm である。

ここでは形状が極めて滑らかであると仮定した。つまり、この不確かさを無視できる大きさに抑えるためには、平面度基準板が極めて滑らかで、高次の形状成分を含んでいないことが重要である。

(4) 平面度基準板の値付けにおける不確かさ　$u_c$

(4.1) 三枚合わせ法で使用したアルゴリズムの不確かさ　$u_{c-a}$

常用参照標準が長さ用 633 nm 実用波長安定化ヘリウムネオンレーザ装置の場合は、平面度基準板の絶対形状は三枚合わせ法により求める。この場合、絶対形状算出作業による不確かさが存在する。

全ての平面の三枚合わせアルゴリズムにおいては、必ず何らかの仮定が存在する。例えば、形状には高周波成分がなく、得られた複数の断面形状の間は滑らかにつながっていることなどである。実際にそれぞれのアルゴリズム自身が持つ不確かさを見積もることは容易ではない。ここでは高周波成分にのみついて検討する。

得られた偏差マップに高周波成分を含んだままであると、偏差マップを使った補正の際の位置ずれ$u_{m-c}$が大きくなる可能性がある。そこで微細な形状は多項式近似や平均化処理により取り去ってしまい、滑らかな偏差マップを使用する。この場合、微細な形状は消滅するので、偏差マップからの形状偏差は不確かさとして扱うことにする。その大きさは$\lambda$/100 以内であるので、一様分布を仮定すると$u_{c-a}$= 1.83 nm である。

常用参照標準が平面度基準板の場合は、校正証明書の値を使用する。

(4.2) 重力による平面度基準板の変形の不確かさ　$u_{c-g}$

平面度基準板は重力により変形するので、その変形量を補正する必要がある。変形量が小さいと見なし補正しない場合は、その変形量を不確かさとして扱う。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

補正した場合でも、その補正の不確かさが存在する。ここでは、重力による変形を FEM 解析と実験により見積もった。これらの差が最大 5 nm であったので一様分布を仮定すると 1σは 1.44 nm である。

(4.3) 平面度基準板値付けの再現性（経年変化を含む） $u_{c-r}$

同じ試料を用いて 1 年の間隔をあけて行った 2 回の三枚合わせ法の結果は、P-V で約 10 nm の一致を示した。一様分布を仮定すると$u_{c-r}$= 2.89 nm である。この値には平面度基準板自身の経年変化も含まれている。さらに、この値には(4.1)に述べた微細形状による影響を含んでおり、若干過大評価であるがこの値を使うことにする。

常用参照標準が平面度基準板の場合は、平面度基準板の経年変化を何らかの方法で見積もり、この値とする。

(4.4) (1)、(2)、(3)から(3.2)を除いた不確かさ $u_{c-o}$

三枚合わせ法による平面度基準板の値付けにおいても、上記の(1)から(3)に述べた不確かさが存在する。ただし(3.2)の偏差マップによる補正は行わないので、その不確かさは含まれない。

以上をまとめたものが表 1 である。合成標準不確かさは 5.74 nm、拡張不確かさは 11.48 nm となる。

表 1

| 要因 | | 標準不確かさ | |
|---|---|---|---|
| 使用したレーザの波長の不確かさ | $u_w$ | 0.77 | |
| 位相測定の不確かさ | $u_p$ | 1.44 | |
| PZT のリニアリティー | $u_{p-p}$ | | 0.09 |
| PZT に印加した電圧の不確かさ | $u_{p-r}$ | | 1.44 |
| テレビカメラによる光強度測定の不確かさ | $u_{p-t}$ | | 0.02 |
| 実際の測定において発生する不確かさ | $u_m$ | 3.44 | |
| 測定の繰り返し | $u_{m-r}$ | | 1.40 |
| 測定位置による不確かさ | $u_{m-p}$ | | 3.14 |
| 偏差マップを使った補正の際の位置ずれ | $u_{m-c}$ | | 0.06 |
| 平面度基準板の値付けにおける不確かさ | $u_c$ | 4.29 | |
| 三枚合わせ法で使用したアルゴリズムの不確かさ | $u_{c-a}$ | | 1.83 |
| 重力による平面度基準板の変形の不確かさ | $u_{c-g}$ | | 1.44 |
| 平面度基準板値付けの再現性 | $u_{c-r}$ | | 2.89 |

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

| | | | |
|---|---|---|---|
| $u_w$、$u_p$ 及び $u_m$（$u_{m-p}$ を除く）を合成した不確かさ | $u_{c-o}$ | | 2.15 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 合成標準不確かさ | $u$ | 5.74 | nm |
| 拡張不確かさ（$k$=2） | $U$ | 11.48 | nm |

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

【平面度校正装置の場合の事例】

1．校正方法の概要

トレーサブルに校正されたオプチカルフラット（平面度校正装置に組み込まない基準板のこと）を測定することにより、装置の不確かさを見積もる。装置によっては、平面度基準板（平面度校正装置に組み込まれる基準板のこと）の形状誤差を補正する機能を持ったものがある。この場合は、その形状誤差を求めるのに使用したものと同じオプチカルフラットを、校正に使用してはならない。

2．不確かさの要因

トレーサブルに校正されたオプチカルフラットを測定する。この場合、校正に使用するオプチカルフラットの（a）形状までがわかっているのか、（b）P-V 値のみがわかっているのかによって扱いが異なる。

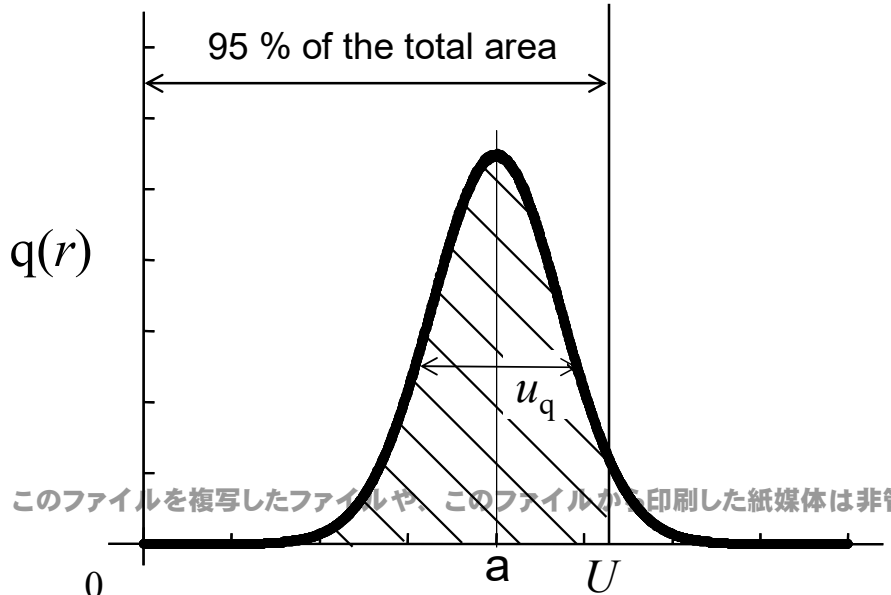
(a) 校正に使用するオプチカルフラットの形状がわかっている場合

トレーサブルに校正されたオプチカルフラットの形状測定結果と校正値（既知の形状）の偏差より不確かさを評価する。不確かさの要因としては、偏差の形状、校正値に付随する不確かさ、表 1 にあげたもののうち測定のばらつきに起因する要因等が挙げられる。

(b) 校正に使用するオプチカルフラットの P-V 値のみがわかっている場合

校正に使用するオプチカルフラットの P-V 値のみがわかっている場合は、校正値（既知の PV 値、ここでは a、付与される不確かさを $u_a$ とする）とその測定結果（PV 値、ここでは b とする）との比較により平面度校正装置の不確かさ評価を行う。

PV 値に対する校正値 a のオプチカルフラットの測定結果が b の場合（a > b とする）、平面度校正装置に使用されている平面度基準版の PV 値の確率分布 q(r)（比較測定に対する不確かさを含む）は、下図の様なガウス分布に近似できる（参考文献 4 参照）。




このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

ここで、ガウス分布の幅 $u_{\mathrm{q}}$ は次式によって与えられる。

$$u_q = \sqrt{u_a^2 + u_b^2 + w_{ab}^2} \qquad (1)$$

式(1)中の $u_{\mathrm{b}}$ は、平面度校正装置の測定結果（平面度基準版との比較測定の結果）に対する不確かさであり、表1で与えられる不確かさの要因から、平面度基準板に関する不確かさを除いて、

$$u_{\mathrm{b}} = \sqrt{u_{\mathrm{w}}^2 + u_{\mathrm{p}}^2 + u_{\mathrm{m\text{-}r}}^2} \qquad (2)$$

と与えられる。また、

$$w_{ab} = \frac{b}{\sqrt{3}} \qquad (3)$$

と与えられる。

図に示す確率分布は、理想的な平面（PV 値が 0）を測定した場合の測定結果の確率分布に対応しており、平面度校正装置の測定能力を表している。従って、図に示す様に、PV 値＝0 からの面積が 95 %となる範囲を、95 %信頼性区間と見なすことができる。ガウス分布に対する面積分布は解析的に求めることができ、結局、拡張不確かさ $U$ は

$$U = \mathrm{a} + 1.645u_{\mathrm{q}} \qquad (4)$$

と簡便な式で与えられる。また、標準不確かさ $u$ は PV 値＝0 からの 2 乗の期待値の平方で与えられるので、

$$u = \sqrt{a^2 + u_q{}^2} \qquad (5)$$

より求められる。従って、包含係数 $k = U/u$ と求められる。

また、校正値 a と測定結果 b の関係が a＜b の場合は、(3)、(4)、(5)式において a と b が入れ替わった形になり、

$$w_{ab} = \frac{a}{\sqrt{3}} \qquad (3)'$$

$$U = \mathrm{b} + 1.645u_{\mathrm{q}} \qquad (4)'$$

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

$$u = \sqrt{b^2 + u_q{}^2} \qquad (5)'$$

より、不確かさを計算することができる。

実際の不確かさ評価においては、オプチカルフラットを単に一回測定するのではなく、平面度基準板に対して回転や移動を加えつつ複数回測定し、校正値との差が最も大きいものを測定結果として採用する。

以上の評価法により、不確かさを評価された平面度校正装置によって、PV 値を校正されたオプチカルフラットを用いてさらに下層の平面度校正装置の不確かさ評価することも可能である。

以上

## 【参考文献】

1. T.Takatsuji, et. al., “Stability of the reference flat used in Fizeau interferometer and its contribution to measurement uncertainty”, *SPIE Proceeding* , Vol. **5190**, pp. 431-439, 2003.
2. K.Hibino and M.Yamauchi, “Phase-Measuring Algorithms to Suppress Spaitiaiiy Nonuniform Phase Modulation in a Two-Beam Interferometer”, *Optical Review*, Vol. **7**, pp. 543-549, 2000.
3. Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) (1995)
4. Y. Bitou, T.Takatsuji, K. Ehara, “Simple uncertainty evaluation method for an interferometric flatness measurement machine using a clibrated test flat”, Metrologia, Vol. 45, pp. 21-26 (2008).

**このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。**

# 今回の改正のポイント

組織改編に伴う名称の変更等

以上

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。